

Simulación matemática del funcionamiento de un quemador acoplado a un secador

| | |
|--------------------------|--|
| Apellidos, nombre | Tomás Egea, Juan Ángel ¹ (juatomeg@upv.es) Castro Giraldez, Marta ^{1,2} (marcasgi@upv.es) Ortolá Ortolá, M ^a Dolores ^{1,2} (mdortola@tal.upv.es) Fito Suñer, Pedro José ^{1,2} (pedfisu@tal.upv.es) |
| Departamento | ¹ Instituto de Ingeniería de los Alimentos para el Desarrollo ² Departamento de Tecnología de los Alimentos |
| Centro | Universitat Politècnica de València |

1 Resumen

En este artículo vamos a desarrollar una herramienta matemática, paso por paso, que sea capaz de simular el comportamiento de un quemador acoplado a un secador alimentario de aire caliente. Para ello veremos los fundamentos del secado con aire caliente, cómo plantear matemáticamente balances y desarrollar el modelo matemático del quemador en función de las variables de las que disponemos.

2 Introducción

La operación de secado por aire caliente es una de las más comunes entre las operaciones de conservación de alimentos y la más extendida entre los procesos que engloba la deshidratación. El objetivo fundamental de la deshidratación es la reducción de la movilidad del agua por debajo de niveles que impidan al alimento degradarse (figura 1). Para ello, se ponen en contacto el producto objetivo de la deshidratación, que tiene una elevada actividad del agua, con un fluido con una baja actividad del agua, de esta forma se crea una inercia termodinámica que crea un flujo de agua desde el producto al fluido.

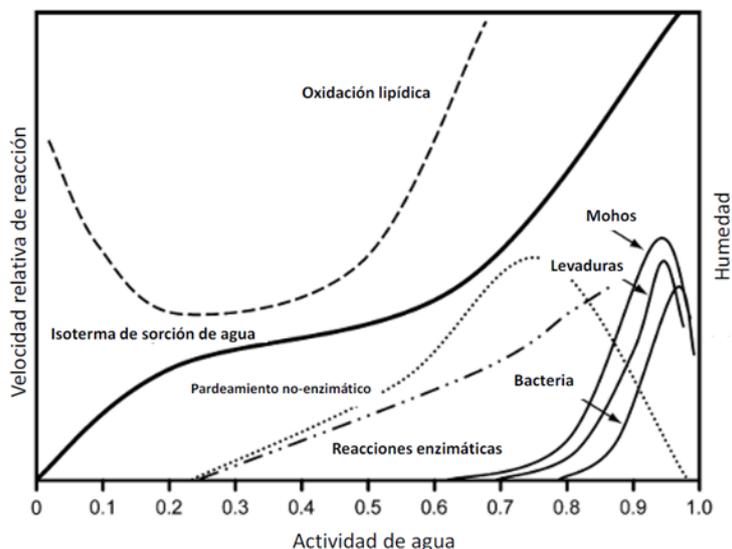


Figura 1. Evolución de la degradación de los alimentos con distintas actividades del agua ^[1].

Esta operación se lleva a cabo en los secadores, los cuales funcionan en su mayoría acoplado un quemador al secador, para que acondicione el aire. Este acondicionamiento consiste en bajar la humedad relativa de un flujo de aire proveniente del exterior, mediante el calentamiento. La humedad relativa (ϕ) describe la proximidad que tiene un volumen de aire de alcanzar la máxima concentración de agua. El quemador está compuesto por dos partes:

- La primera parte es una cámara de combustión, donde se calienta el flujo de aire externo con una llama generada quemando combustible. Aumentando la temperatura del aire se consigue aumentar su energía, lo que provoca una expansión del aire. La humedad relativa bajará, ya que, aunque la cantidad de agua que tiene el aire sea la misma, al estar dispersa en un volumen mayor,

estará presente en una proporción menor respecto a cuando entró a la cámara de combustión.

- La segunda parte consiste en un mezclador de aire. El aire que sale de la cámara de combustión suele tener temperaturas muy altas, que normalmente no son recomendables para el secado de alimentos, debido a que contienen muchos compuestos termolábiles. Para solucionar este problema, se mezcla el flujo de aire proveniente de la cámara de combustión con un flujo de aire del exterior que baje su temperatura hasta la ideal para nuestro producto. Aunque esto aumente la humedad relativa del flujo de aire final, este aumento no es significativo.

3 Objetivos

Una vez que el alumno lea este documento, será capaz de:

- Plantear los balances de energía y masa implicados en el proceso de secado con aire caliente.
- Determinar las corrientes de entrada y salida del sistema.
- Diseñar un modelo matemático sencillo, capaz de simular el funcionamiento de un secador basado en el secado por aire caliente.

4 Desarrollo

El desarrollo de un modelo matemático que describa el proceso de secado con aire caliente, en un secador alimentario con quemador acoplado, es útil para simular y predecir de forma virtual distintos aspectos del proceso, como por ejemplo el CO_2 que generará un combustible o el caudal de aire necesario, antes de ponerlos en práctica.

- 4.1. Fundamentos de los balances de un sistema: guía básica para plantear un balance respecto a un sistema.
- 4.2. Materia: aspectos a tener en cuenta para plantear los balances de materia.
- 4.3. Energía: aspectos a tener en cuenta para plantear los balances de energía.
- 4.4. Diseño del quemador: Planteamiento matemático utilizando balances de energía, materia y propiedades termodinámicas para desarrollar el modelo matemático.

4.1 Fundamentos de los balances

Los balances son una herramienta matemática ampliamente utilizada en la industria como balances de energía o materia, ambos utilizados en este documento.

Para ello se debe definir un sistema, que es la operación o conjunto de operaciones del proceso en cuestión. El sistema en ocasiones puede ser dividido en operaciones unitarias, que son indivisibles en otras operaciones. Una vez planteado el sistema y sus operaciones unitarias, todos sus cálculos están sujetos al primer principio de la termodinámica o principio de Lavoisier que describe las transformaciones de la materia y la energía con la siguiente expresión (ecuación 1).

$$\text{Entradas} + \text{Generación} = \text{Salidas} + \text{Acumulación} \quad (1)$$

En el caso de este documento, el balance se plantea sobre el quemador acoplado al secador. Por tanto, el sistema es el quemador y está dividido en dos operaciones unitarias: la cámara de combustión y el mezclador de aire (Figura 2). Algunos ejemplos de entradas son el flujo de aire de entrada y de combustible, de generación es la energía obtenida quemando el combustible y de salidas el flujo de aire de salida y de cenizas.

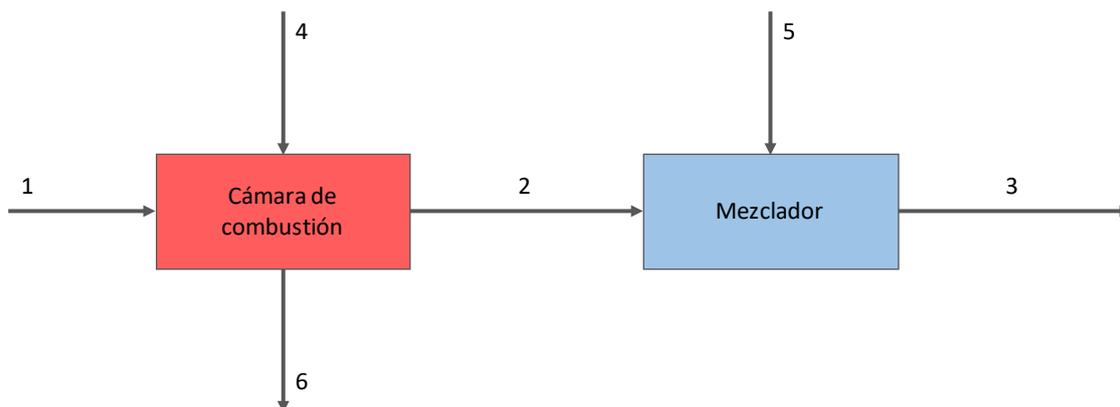


Figura 2. Entrada de aire a la cámara de combustión; 2: entrada de aire al mezclador; 3: salida de aire hacia el secador; 4: entrada de combustible; 5: entrada de aire exterior al mezclador; 6: salida de cenizas.

4.2 Materia

Los balances de materia de este sistema van a consistir principalmente en corrientes másicas de aire húmedo. Se denomina "aire húmedo" a la mezcla de nitrógeno, oxígeno, dióxido de carbono, argón y agua. Cuando se agrupan todos los componentes salvo el agua se denomina "aire seco", los cuales se mantienen de forma casi constante en la atmósfera [2]. Es importante destacar que debido a las propiedades del vapor, este se convierte en inmisible con el aire a partir de 373,9 °C.

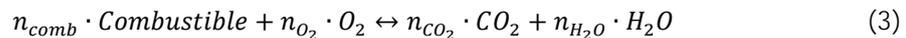
La humedad absoluta (X) es la razón másica de agua que tiene el aire, representa el contenido en agua en una cantidad de aire y se expresa en $\text{kg}_w \cdot \text{kg}_{as}^{-1}$. Cuando el aire está en condiciones normales presenta un comportamiento ideal, por tanto, la razón y fracción molar se explican de forma barométrica y volumétrica. De acuerdo con esto, la humedad absoluta será la razón molar expresada barométricamente (ecuación 2).

$$X = \frac{M_r w \cdot p_v}{M_r as \cdot (P - p_v)} \quad (2)$$

Donde M_r es la masa molecular en $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$, p_v es la presión parcial de vaporización en mmHg y P es la presión absoluta del aire en mmHg. El subíndice w indica el agua y el as el aire seco.

Para alimentar la llama del quemador hay una corriente másica de combustible que entra a la cámara de combustión y su composición vendrá definida por el combustible seleccionado. Algunos combustibles no transforman toda su masa en energía y producen cenizas, creando así una corriente másica de salida de la cámara de combustión.

Según la reacción de combustión (ecuación 3) se produce una generación de compuestos en la cámara de combustión, en la cual se consume oxígeno y el combustible, y se genera dióxido de carbono y agua. Para que la llama no se apague se mantiene un mínimo de oxígeno, fijado en un 5 % [3]. En cuanto al término de generaciones de los balances, es importante destacar que cuando un compuesto se consume irá con signo negativo y cuando se genera con el positivo.



Donde n es la relación estequiométrica.

Por último en cuanto a materia, para pasar de caudales másicos de aire húmedo (M) a caudales másicos de aire seco (M'), que es el utilizado a la hora de calcular con la humedad absoluta (X), se usa la ecuación 4.

$$M' = \frac{M}{1+X} \quad (4)$$

4.3 Energía

La energía del sistema la vamos a estudiar teniendo en cuenta las propiedades del aire y del combustible.

La entalpía del aire húmedo (h) define la cantidad de energía que tiene el aire por unidad de masa y se puede calcular sumando la energía interna (u) y el trabajo de flujo (P·V). Esta magnitud requiere de un sistema de referencia para su cálculo que sitúe el umbral de la entalpía cero, el más utilizado por la comunidad científica es el recomendado por la IUPAC en condiciones normales (T = 0 °C, P = 1 atm y agua en estado líquido).

El cálculo de la entalpía de vaporización se realiza teniendo en cuenta que toda el agua está en forma de vapor (ecuación 5):

$$h_v = \Delta G^v + C_{p_w}(T - 0) \quad (5)$$

Donde ΔG^v es la entalpía de vaporización del agua en $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, C_{p_w} es el calor específico del agua en forma de vapor en $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ y T es la temperatura del aire en °C.

La entalpía de aire seco (h_{as}) no contabiliza el trabajo de flujo, así que solo es necesario incluir en la ecuación el cambio en la energía interna (ecuación 6):

$$h_{as} = C_{p_{as}}(T - 0) \quad (6)$$

Por tanto, la variación de entalpía del aire (h) respecto al sistema de referencia propuesto por la IUPAC se expresa en base al caudal de aire seco para facilitar los balances en el posterior diagrama según la ecuación 7.

$$h = u + P \cdot V = (C_{p_w} \cdot X + C_{p_{as}}) \cdot (T - 0) + X \cdot \Delta G^v \quad (7)$$

En cuanto al combustible, va a ser necesario conocer su masa molecular, calor específico, calor latente de cambio de estado, su temperatura de llama y su fórmula química para elaborar la reacción de combustión (ecuación 3). En la tabla 1 hay algunos ejemplos de materiales combustibles con sus datos

Tabla 1. Tabla con la fórmula química, reacción de combustión, masa molecular (M_r), calor específico (C_p), calor latente de combustión (ΔG) y temperatura de llama (T_{llama}) [4] [5]. * Temperaturas que hay que hallar experimentalmente.

| Componente | Fórmula | Reacción | M_r (g·mol ⁻¹) | C_p (kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹) | ΔG (kJ·kg ⁻¹) | T_{llama} (°C) |
|-----------------------|---|---|------------------------------|---|-----------------------------------|------------------|
| Celulosa | C ₆ H ₁₀ O ₅ | C ₆ H ₁₀ O ₅ + 6O ₂ = 6CO ₂ + 5H ₂ O | 162,1406 | 1,4 | 16996 | * |
| Hemicelulosa | C ₆ H ₁₀ O ₆ | C ₆ H ₁₀ O ₅ + 6O ₂ = 6CO ₂ + 5H ₂ O | 162,1406 | 1,4 | 16592 | * |
| Lignina | C ₃₁ H ₃₄ O ₁₁ | C ₃₁ H ₃₄ O ₁₁ + 34O ₂ = 31CO ₂ + 17H ₂ O | 582,59506 | 1,2 | 18012 | * |
| Aceite / Ácido oléico | C ₁₈ H ₃₄ O ₂ | 2C ₁₈ H ₃₄ O ₂ + 51O ₂ = 36CO ₂ + 34H ₂ O | 282,46136 | 1,79 | 39000 | * |
| Glucosa | C ₆ H ₁₂ O ₆ | C ₆ H ₁₂ O ₆ + 6O ₂ = 6CO ₂ + 6H ₂ O | 180,15588 | 1,244 | 14080 | * |
| Fructosa | C ₆ H ₁₂ O ₆ | C ₆ H ₁₂ O ₆ + 6O ₂ = 6CO ₂ + 6H ₂ O | 180,15588 | 1,244 | 14080 | * |
| Gasoil | C ₁₂ H ₂₃ | 4C ₁₂ H ₂₃ + 71O ₂ = 48CO ₂ + 46H ₂ O | 167,31102 | 2,05 | 44800 | 2138 |
| Metano | CH ₄ | CH ₄ + 2O ₂ = CO ₂ + 2H ₂ O | 16,04246 | 2,197 | 55500 | 1963 |
| Etano | C ₂ H ₆ | 2C ₂ H ₆ + 7O ₂ = 4CO ₂ + 6H ₂ O | 30,06904 | 1,6435 | 51900 | 1955 |
| Propano | C ₃ H ₈ | C ₃ H ₈ + 5O ₂ = 3CO ₂ + 4H ₂ O | 44,09562 | 1,6513 | 50350 | 1980 |
| Etanol | C ₂ H ₆ O | C ₆ H ₁₂ O ₆ + 3O ₂ = 2CO ₂ + 3H ₂ O | 46,06844 | 2,44 | 29800 | 2082 |

4.4 Diseño del quemador

Las variables a estudiar vendrán definidas por el tipo de secado que se va a aplicar, por ende, el diseño del quemador debe realizarse a partir de las variables de salida, que son el caudal de aire de salida del mezclador y su temperatura (corriente 3), estas variables a su vez son las que tendrá el aire caliente en el secador y se fijarán en función del tipo de secado. Otras variables del aire que serán fijas son la temperatura, humedad relativa y composición del aire exterior (corrientes 1 y 5).

Por ejemplo, si se desea secar un producto alimentario, pero evitando las reacciones de Maillard, se fijará una temperatura de 60 °C y un caudal de 100 kg/h de aire húmedo, suficiente para eliminar la capa límite equivalente (esta situación se alcanza al superar una velocidad del aire de 5,13 m/s [6]). Una temperatura de 25 °C, humedad relativa del 60 % y la composición del aire de la atmósfera son ejemplos comunes de las condiciones del aire exterior.

En la cámara de combustión se producirán procesos distintos dependiendo de la composición del combustible. Si el combustible tiene humedad en su interior, habrá que gastar energía en evaporar esa agua antes de llegar a la combustión, por tanto habrá que incluirlo en el balance energético. Otro aspecto a tener en cuenta es la generación de cenizas, provocada por combustibles que tengan compuestos que no combustionan.

Por ejemplo, el gas natural no deja residuos al combustionar y no tiene que evaporar agua, pero si quemamos cascarilla de arroz, esta deja hasta un 40 % de su peso inicial en cenizas y tiene que evaporar su humedad para combustionar.

Debido a los grados de libertad que presenta el sistema (Figura 3) no es posible calcular las variables que no están definidas desde el inicio, por tanto, hay que recurrir a la iteración mediante la herramienta "Solver" del Excel. Para llegar a ese punto hay que plantear los balances del sistema.

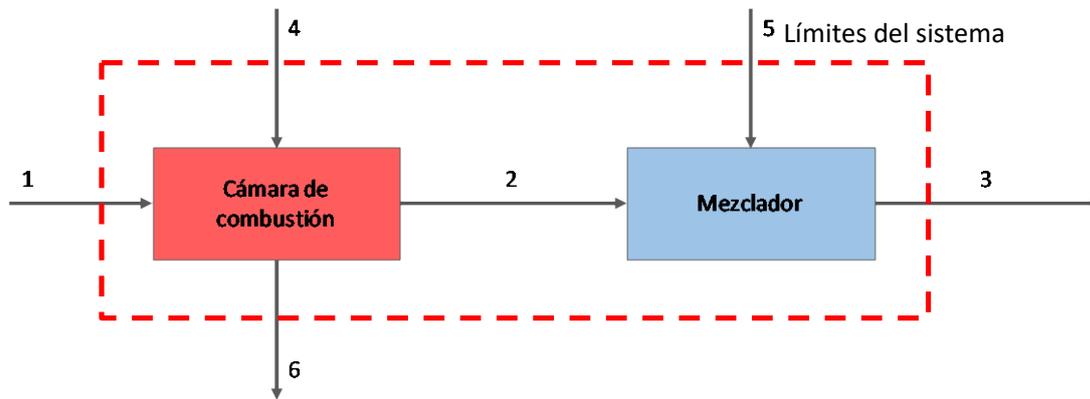


Figura 3. Sistema que representa el quemador.

4.4.1 Balance estequiométrico: Generación

Primero hay que resolver la generación de compuestos que está provocando la reacción de combustión de la cámara. En ella, como se ha indicado anteriormente, se está generando CO_2 y H_2O y se está consumiendo combustible y O_2 (como máximo hasta un 5 %), cada uno presente en función de su relación estequiométrica (n), definida por su reacción de combustión.

Para calcular los valores de generación se utilizará un balance estequiométrico, representado en la ecuación 8, en la cual conocemos la generación del combustible ($G_{\text{combustible}}^n$), que se calcula con la ecuación 9, las relaciones estequiométricas de la reacción de combustión (n_i) y los pesos moleculares (M_{ri}).

$$\frac{G_{\text{combustible}}^n}{n_{\text{combustible}} \cdot M_{r \text{combustible}}} = \frac{G_w^n}{n_w \cdot M_{r w}} = \frac{G_{\text{CO}_2}^n}{n_{\text{CO}_2} \cdot M_{r \text{CO}_2}} = \frac{G_{\text{O}_2}^n}{n_{\text{O}_2} \cdot M_{r \text{O}_2}} \quad (8)$$

$$G_{\text{combustible}}^n = x_c \cdot m_4 \quad (9)$$

Siendo x_c la fracción másica combustible y m_4 el caudal másico de entrada de combustible a la cámara de combustión.

En el caso de haber más de un elemento combustible, como por ejemplo en la cascarilla de arroz (lignina + celulosa), habrá que hacer un balance estequiométrico para cada elemento por separado.

4.4.2 Balance total de materia

Se plantea un balance total de materia de las corrientes que comprenden los límites del sistema (1, 3, 4, 5 y 6 si lo hubiese). Esto resulta en la ecuación 10, en la cual se han sumado los caudales másicos (M) 1 y 5 por tener la misma composición del aire.

$$M_{1+5} = M_3 + m_6 - m_4 \quad (10)$$

Donde M_{1+5} es el caudal másico de aire ambiente de entrada al quemador en $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$, M_3 es el caudal másico de aire que sale del mezclador en $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$, m_4 es el caudal másico de combustible de entrada al quemador en $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ y m_6 es el caudal másico de cenizas de salida del quemador en $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$.

4.4.3 Balances de materia por composición

Con el objetivo de conocer la composición del aire de salida se plantean distintos balances de materia (ecuación 11), uno para cada componente de las corrientes que componen el balance global del sistema.

$$M_{1+5} \cdot x_{i\ 1,5} \pm \sum G_i^j + m_4 \cdot x_{i\ 4} = M_3 \cdot x_{i\ 3} \quad (11)$$

Donde x es la fracción másica en g/g de cada compuesto, G_i^j es el término de generación del balance y el subíndice i es O_2 , CO_2 o H_2O .

4.4.4 Balance energía

El objetivo de este subapartado es el de calcular la entalpía del aire de salida del quemador (h_3), mediante balances de energía (ecuación 12).

$$h_3 = \frac{M'_{1+5} \cdot h_{1,5} + E_T}{M'_3} \quad (12)$$

Donde M' es el caudal másico de aire seco de cada corriente expresados en $kg_{as} \cdot h^{-1}$, E_T la energía total en $kJ \cdot h^{-1}$ y $h_{1,5}$ es la entalpía del aire ambiente por unidad de masa de aire seco del aire ambiente expresada en $kJ \cdot kg_{as}^{-1}$.

Para desarrollar la ecuación 12, hace falta plantear un balance de energía total (ecuación 13, 14 y 15) que calcule la energía total del sistema (E_T).

$$E_T = E_T^c - \Delta U \quad (13)$$

Donde E_T^c es la energía aportada por la reacción de combustión en $kJ \cdot h^{-1}$ y ΔU es la energía interna del aire.

$$E_T^c = \sum (m_4 \cdot x_{i\ 4} \cdot \Delta G_i^c) \quad (14)$$

Donde el subíndice "i" representa los distintos elementos combustibles del combustible.

$$\Delta U = \sum (C_{p\ i} \cdot m_4 \cdot x_{i\ 4} \cdot (T_{llama\ i} - T_{amb})) + C_{p\ w} \cdot m_4 \cdot x_{w\ 4} \cdot (T_{llama} - T_{amb}) \quad (15)$$

Donde C_p es el calor específico en $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$, T es la temperatura en K y el subíndice "i" representa los distintos elementos combustibles del combustible.

4.4.5 Iteración

Por último, para resolver el problema de los grados de libertad, se plantea una iteración entre la entalpía del aire obtenida mediante el balance (h_3 BET) y la obtenida mediante la ecuación general de la energía (h_3 Ec. General) (figura 4). Este cálculo se resolverá con la herramienta "Solver" del Excel.

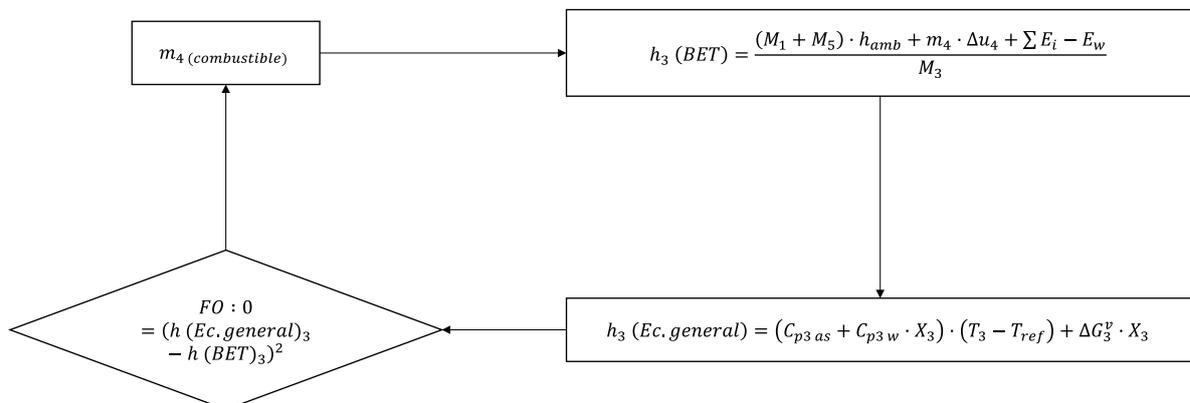


Figura 4. Diagrama de iteración para el cálculo del caudal de combustible de entrada al quemador.

Con la iteración planteada se pueden separar los caudales másicos de aire que hemos sumado en el apartado 4.4.2 (M_1 y M_5), calcular la masa de combustible necesaria para cubrir las necesidades energéticas y la composición que tendrá la

corriente de aire que entra al secador (M_3). Cubiertas estas variables ya conocemos todos los secretos del quemador, pudiéndose utilizar como herramienta para comparar lo que contaminan dos combustibles, ajustar un secador alimentario antes de usarlo.

5 Cierre

A lo largo de este objeto de aprendizaje, hemos planteado multitud de balances y ecuaciones basadas en los principios de la termodinámica, los cuales han servido para desarrollar la herramienta de simulación del quemador. También, de forma indirecta se han visto los fundamentos del secado con aire caliente y el funcionamiento de un secador industrial clásico con un quemador acoplado.

6 Bibliografía

- [1] LABUZA T. P., ALTUNAKAR B., 2007, "Water Activity Prediction and Moisture Sorption Isotherms in Water Activity in Foods: Fundamentals and Applications". Vol. 109-154. G. V. Barbosa-Cánovas, A. J. Fontana, S. J. Schmidt, and T. P. Labuza. Ed: IFT Press and Blackwell Publishing, Iowa, USA.
- [2] BARBOSA-CÁNOVAS G.V., VEGA-MERCADO H., 1996, "Dehydration of Foods". Ed: Springer Science & Business Media. 330 pp.
- [3] ZLOCHOWER I. A., GREEN G. M, 2009, "The limiting oxygen concentration and flammability limits of gases and gas mixtures". *Journal of loss prevention in the process industries*, 22(4), 499-505.
- [4] REED R.J., 1978, "North American Combustion Handbook", Second Edition. Ed: North American Manufacturing. 332 pp.
- [5] HAYNES W.M., Junio 2015, "CRC Handbook of Chemistry and Physics", 96th Edition. p. 15-51. Ed: CRC Press.
- [6] GREEN D., PERRY R., 2007, "Perry's Chemical Engineers' Handbook", Eighth Edition. Ed: McGraw-Hill Education. New York (USA). 2585 pp.